

Tinjauan Pengaruh Jenis Partikel Halloysite *Nanotubes* dan Montmorillonite *Nanoclay* terhadap Morfologi dan Sifat Mekanik pada Komposit Poliester Tak Jenuh/Partikel Nano untuk Aplikasi Lapisan Gel pada Kapal Laut

Imam Prayoga, Hosta Ardhyanta, dan Amaliya Rasyida

Departemen Teknik Material dan Metalurgi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: hostaa@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Material baru yang kuat dan ringan merupakan fokus utama pada dunia penelitian maupun industri. Komposit merupakan jenis material baru dengan mengandalkan matriks dan penguatnya. Poliester tak jenuh merupakan salah satu jenis matriks yang memiliki sifat ketahanan terhadap air dan kimia yang baik. Namun, poliester tak jenuh memiliki keterbatasan dalam sifat mekaniknya yang kaku. Nanokomposit dengan penguat nanopartikel merupakan salah satu metode untuk meningkatkan sifat mekanik, serta ketahanan termal pada komposit polimer. Nanopartikel dengan berbagai macam jenis telah diteliti pengaruhnya terhadap polimer poliester tak jenuh. Pada tinjauan ini, telah dipelajari pengaruh dari penambahan nanopartikel terhadap morfologi menggunakan SEM, sifat mekanik berupa kekuatan tarik, kekuatan tekan, dan kekuatan lentur dari bentuk dan jenis partikel halloysite *nanotubes* dan montmorillonite *nanoclay* terhadap nanokomposit polimer poliester tak jenuh. Didapatkan bahwa pada semua jenis penambahan nanopartikel telah memengaruhi morfologi dari nanokomposit. Kemudian, didapatkan bahwa jenis nanopartikel pada tinjauan ini juga meningkatkan sifat mekanik dengan penambahan pada rasio tertentu.

Kata Kunci—Poliester Tak Jenuh, Halloysite *Nanotubes*, Montmorillonite *Nanoclay*, Komposit, Lapisan Gel.

I. PENDAHULUAN

PERKEMBANGAN zaman yang begitu cepat telah mengubah pola hidup dan kebutuhan manusia. Hal tersebut menuntut dunia industri dalam menciptakan sebuah material yang lebih baik dibandingkan sebelumnya. Komposit merupakan sebuah gabungan antara dua material atau lebih dengan tujuan memperbaiki dan melengkapi sifat material kombinasinya agar bisa mendapatkan keunggulan pada material tersebut [1]. Komposit memiliki keunggulan dibanding material lainnya, yaitu memiliki kekuatan yang sangat baik, ketahanan bereaksi dengan kimia rendah, kemudahan dalam manufakturnya, serta murah. Komposit juga banyak digunakan untuk kebutuhan sehari-hari, contohnya otomotif, alat olahraga, jembatan, badan kapal, dll [2]. Selain mudah dibentuk, komposit dengan penguat juga mendukung peningkatan kekuatan, serta sifat mekanik yang lain dibanding komposit berpenguat lainnya. Dalam pengikatan penguat, komposit menggunakan matriks jenis polimer untuk dapat

membantu menaikkan kekuatan serta melindungi serat dari lingkungan sekitar [3]. Matriks pada komposit memiliki kemampuan menyerap dan menyebarkan energi secara merata paling besar pada susunannya. Resin poliester tak jenuh banyak digunakan dalam banyak hal, khususnya pada bidang yang membutuhkan ketahanan terhadap sifat kimia dan air yang tinggi. Sehingga cocok digunakan dalam aplikasi diperaian [4]. Salah satunya cara untuk meningkatkan sifat dari komposit yaitu pada penggunaan material komposit berpenguat nanopartikel. Nanokomposit merupakan salah satu metode untuk meningkatkan sifat mekanik pada komposit karena cenderung dapat menahan pergerakan fase matriks di sekitar masing-masing partikel [3]. Berbagai macam jenis nanopartikel telah banyak diteliti pengaruhnya terhadap komposit polimer poliester tak jenuh. Peningkatan sifat mekanik pada komposit terjadi secara signifikan dengan penambahan nanopartikel pada kadar yang tepat. Tinjauan ini akan menganalisis terkait potensi dan keefektifan dari bentuk (*nanotubes* dan *platelets*) dan jenis nanopartikel yang digunakan pada penguatan partikel yaitu Halloysite *Nanotubes* dan Montmorillonite *Nanoclay* terhadap morfologi dan sifat mekanik dalam komposit bermatriks poliester tak jenuh.

II. METODOLOGI

Pada artikel ini membahas terkait tinjauan penambahan halloysite *nanotube* dan montmorillonite *nanoclay* terhadap morfologi, sifat mekanik, dan perbandingan kedua jenis komposit bermatriks poliester tak jenuh, serta aplikasinya.

A. Material

Material yang telah ditinjau pada *review* adalah resin poliester tak jenuh. *Methyl Ethyl Ketone Peroxide* sebagai katalis dan *Peroxide Based* sebagai akselerator. Kemudian partikel yang digunakan pada tinjauan ini yaitu Halloysite *nanotubes* dengan rumus kimia $(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4.n\text{H}_2\text{O})$, memiliki bentuk partikel *nanotubes*, panjang 1 μm , diameter luar 30 – 60 nm, dan diameter dalam 15 – 30 nm. Kemudian partikel yang digunakan pada tinjauan ini yaitu Montmorillonite *nanoclay* dengan rumus kimia $(\text{Ca}_{0.014}\text{Na}_{0.02})(\text{Al}_{1.66}\text{Mg}_{0.36}\text{Fe}_{0.04})_2(\text{Si}_{3.90}\text{Al}_{0.10})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.1.02\text{H}$

Tabel 1.
Ruang lingkup pembahasan

Komposit	M ^a	ST ^b	SK ^c	SL ^d
Poliester tak jenuh/Halloysite <i>Nanotubes</i>	V	V	V	V
Poliester tak jenuh/Montmorillonite <i>Nanoclay</i>	V	V	V	V

^aM: Morfologi; ^bST: Sifat Tarik; ^cSK: Sifat Keras; ^dSL: Sifat Lentur.

20), memiliki bentuk partikel *plateles*, kuran partikel <100 nm.

B. Manufaktur

Metode manufaktur yang telah ditinjau pada *review* ini secara umum adalah melakukan persiapan alat dan bahan. Kemudian nanopartikel dicampurkan dengan polimer poliester tak jenuh dengan cara *mechanical mixing* 600 – 2000 rpm selama 10 – 180 menit. Lalu campuran diberikan perlakuan sonikasi selama 15 – 60 menit untuk membantu persebaran nanopartikel di dalam matriks. Selanjutnya, ditambahkan katalis dan akselerator ke dalam campuran matriks. Tahap akhir yaitu, proses penguatan campuran komposit ke dalam cetakan untuk proses curing selama beberapa 24 jam pada temperatur kamar. Post-cured dilakukan pada proses akhir pembuatan nanokomposit berpenguat halloysite *nanotube* dengan cara dipanaskan pada 60 – 80°C selama 120 menit.

C. Pengujian Material

Material komposit dengan penguatnya berupa partikel nano dilakukan karakterisasi morfologinya menggunakan SEM dan pengujian sifat mekanik yang terdiri dari pengujian tarik, pengujian kekerasan, dan pengujian lentur.

1) SEM (Scanning Electron Microscope)

Pengujian SEM dilakukan untuk mengetahui morfologi atau struktur permukaan, ukuran partikel, serta bentuk partikel dari suatu material. Pengujian ini menggunakan hamburan electron yang ditangkap detector sehingga membentuk suatu gambar morfologi. SEM bekerja menggunakan *electron gun* yang memiliki katoda tungsten untuk menembakkan sinar electron. Pengujian ini didasarkan pada standar ASTM E986. Hasil pancaran dari elektron akan dimunculkan pada lapisan-lapisan yang membentuk gambar. Kemudian hasil pantauan dari inelastic akan membentuk elektron sekunder. Dari pantulan inelastic diperoleh sinyal elektron sekunder, sedangkan pantulan elastis didapatkan sinyal *back-scattered electron*. Elektron sekunder memperlihatkan topografi dari benda yang dianalisis, seperti permukaan tinggi akan berwarna lebih cerah dan sebaliknya. *Back-scattered electron* akan memberikan perbedaan berat molekul dari atom-atom permukaan yang tersusun, seperti atom dengan berat molekul yang tinggi akan berwarna lebih cerah dan sebaliknya [1].

2) Pengujian Kekuatan Tarik

Pengujian Tarik dilakukan untuk mengetahui kekuatan tarik dari sebuah material dengan menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM). Pengujian ini akan menunjukkan kekuatan maksimal dari sebuah pembebanan secara vertikal dua arah (atas dan bawah) dari sebuah material. Pengujian ini dilakukan dengan standar yang digunakan adalah ASTM

D3039 *Balance and Symmetric* berdimensi 250 mm x 25 mm x 6 mm. Pada jurnal [5] menggunakan *speed rate* sebesar 1 mm/menit, sedangkan pada jurnal [6] menggunakan *speed rate* sebesar 5 mm/menit.

3) Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui kekerasan dari material dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada permukaan sampel. Pengujian ini menggunakan metode Shore D Hardness Durometer sesuai dengan standar ASTM D2240 [7]. Pada jurnal [8] menggunakan 5 spesimen sesuai standar.

1) Pengujian Kekuatan Tekuk

Pengujian kekuatan tekuk dilakukan untuk menunjukkan sifat kekakuan dari material saat terjadinya pembengkokkan pada benda kerja. Pengujian ini dilakukan dengan Metode *Three Point Bending*, dimana spesimen akan diletakan pada 2 tumpuan dan dilakukan pembebanan dari arah tengah spesimen. Standar pengujian yang digunakan adalah ASTM D790. Pada jurnal [9] menggunakan *speed rate* sebesar 1 mm/menit, sedangkan pada jurnal [10] menggunakan *speed rate* sebesar 1.15 mm/menit.

D. Variabel Pembahasan

Variable pembahasan yang digunakan terhadap morfologi dan sifat mekanik nanokomposit poliester tak jenuh ditentukan berdasarkan jenis nanopartikelnya yaitu partikel halloysite *nanotube* dan montmorillonite *nanoclay*. Tinjauan akan membahas bagian dari morfologi dan sifat mekanik komposit dengan nanopartikel sebagai fillernya dengan minimal 3 jurnal utama. Pembahasan akan terdiri dari 2 jurnal dengan ruang lingkup pembahasan nanopartikel terhadap morfologi komposit, 4 jurnal dengan ruang lingkup pembahasan nanopartikel terhadap sifat tarik, 2 jurnal dengan ruang lingkup pembahasan nanopartikel terhadap sifat keras, dan 2 jurnal dengan ruang lingkup pembahasan nanopartikel terhadap sifat lentur.

E. Ruang Lingkup Pembahasan

Ruang lingkup pembahasan dari tinjauan kali ini akan meliputi beberapa karakterisasi morfologi dan pengujian sifat mekanik seperti pada Tabel 1.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Review jurnal ini dilakukan dengan pembahasan berbasis material berdasarkan jenis nanopartikel sebagai berikut.

A. Poliester tak jenuh/Halloysite Nanotubes

Morfologi dari material nanokomposit poliester tak jenuh/halloysite *nanotube* telah diteliti [7] dengan penambahan nanopartikel dengan kadar 1%, 3%, 5%, 7%, dan 9%. Karakterisasi morfologinya menggunakan *scanning electron microscopy* atau SEM dideskripsikan pada Tabel 2.

Pada Tabel 2 dapat dilihat bahwa penambahan partikel Halloysite *Nanotubes* dapat tersebar dan terdispersi dengan baik. Penambahan nanopartikelnya juga memengaruhi struktur dari permukaan nanokomposit Poliester tak jenuh/HNT. Kemudian dapat terlihat bahwa seiring dengan penambahan

Tabel 6.

Morfologi nanokomposit Poliester Tak Jenuh/halloysite *nanotubes*

Nanopartikel	Kadar Penambahan (%)	Morfologi
Halloysite <i>Nanotubes</i>	1	a) Peningkatan kekasan patahan
		b) Terjadinya dispersi nanopartikel
		c) Pola patahan belum terpengaruh signifikan
	3	a) Terjadinya peningkatan kekasaran permukaan
		b) Sudah mulai terbentuk aglomerasi
		c) Pola patahan menjadi acak
	5	d) Persebaran partikel nano merata
		a) Kekasaran permukaan semakin banyak terjadi
		b) Sudah terbentuk <i>cluster debonding</i>
		c) Memiliki pola patahan acak
		d) Sudah terjadinya aglomerasi

Tabel 6.

Nilai kekuatan tarik nanokomposit poliester tak jenuh/halloysite *nanotubes*

Nanopartikel	Kadar (%)	Peningkatan Nilai Kekuatan Tarik (%)
Halloysite <i>Nanotubes</i>	0	0
	1	4
	3	11
	5	7
	7	-11
	9	-15

Halloysite *Nanotubes* sebagai filler, kekasaran permukaan pada nanokomposit akan semakin banyak.

Dapat dilihat terjadinya peningkatan daerah kasar pada gambar (c) penambahan HNT sebanyak 5% dibandingkan dengan gambar (a) pada penambahan 1%. Semakin kasar permukaan, semakin besar pula tegangan geser yang dihasilkan. Namun seiring dengan adanya penambahan partikel halloysite, mulai terjadi peristiwa *cluster debonding* pada penambahan 5%. Hal ini menandakan bahwa nanopartikel halloysite berpotensi tidak dapat meningkatkan sifat mekanik pada penambahan 5% [7].

Penambahan halloysite *nanotubes* pada kadar tertentu akan menyebabkan peristiwa *cluster debonding* dan terbentuknya *microvoids* pada nanokomposit. *Cluster debonding* terjadi karena adanya interaksi yang baik antar partikel pada komposit. Hal tersebut cenderung membuat berkurangnya ikatan partikel dengan matriks dan dapat membuat nilai sifat mekanik menurun. *Microvoids* juga akan terbentuk saat adanya penambahan partikel. Hal tersebut dapat berfungsi sebagai penghambat rambatan retak dan pengurangan konsentrasi tegangan [7].

Sifat kekuatan tarik telah diteliti [9] untuk penambahan halloysite *nanotubes* ke dalam nanokomposit bermatriks poliester tak jenuh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 4.

Nilai kekerasan nanokomposit poliester tak jenuh/halloysite *nanotubes*

Nanopartikel	Kadar (%)	Peningkatan Nilai Kekerasan (%)
Halloysite <i>Nanotubes</i>	0	0
	1	48
	3	49
	5	41
	7	34
	9	38

Tabel 4.

Nilai kekuatan lentur nanokomposit poliester tak jenuh/halloysite *nanotubes*

Nanopartikel	Kadar (%)	Peningkatan Nilai Kekuatan Lentur (%)
Halloysite <i>Nanotubes</i>	0	0
	1	5
	3	10
	5	6
	7	-8
	9	-10

Tabel 4.

Morfologi nanokomposit Poliester Tak Jenuh/Montmorillonite *Nanoclay*

Nanopartikel	Kadar Penambahan (%)	Morfologi
Montmorillonite <i>Nanoclay</i>	0	a) Permukaan patahan halus
		b) Pola patahan lurus
	5	a) Kekasaran permukaan meningkat
		b) Nanopartikel terdispersi secara merata dan acak

Didapatkan pada Tabel 3, bahwa terjadinya peningkatan maksimal pada penambahan HNT sebanyak 3% dengan peningkatan kekuatan tarik sebesar 11% dibandingkan dengan penambahan 0% HNT. Hasil ini pun menunjukkan bahwa setelah terjadinya penambahan 3%, grafik kekuatan tarik semakin menurun. Penurunan signifikan terjadi pada penambahan 7% yaitu memiliki nilai dibawah nanokomposit dengan 0% penambahan, yaitu sebesar -11%.

Hal tersebut menunjukkan adanya keterbatasan komposisi maksimal penambahan nanopartikel HNT dalam nanokomposit yang memengaruhi nilai kekuatan tarik setelah penambahan 3%. Adanya kenaikan nilai kekuatan tarik dapat disebabkan oleh gaya *mechanical interlock* yang terjadi pada nanokomposit. Namun karena halloysite tersusun atas unsur clay, karakteristik partikelnya tidak dapat meningkatkan nilai kekuatan tariknya secara signifikan [9]. Peningkatan kadar diatas titik optimumnya juga akan menyebabkan terjadinya aglomerasi pada nanopartikel, dan akan memengaruhi nilai kekuatan tariknya.

Sifat kekerasan telah diteliti [7] untuk penambahan halloysite *nanotubes* ke dalam nanokomposit bermatriks poliester tak jenuh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.

Didapatkan pada Tabel 4, bahwa adanya kenaikan nilai kekerasan seiring dengan adanya penambahan kadar HNT kepada nanokomposit. Pada penambahan sebanyak 3%, nanokomposit memiliki nilai kekerasan paling tinggi dengan peningkatan nilai kekerasan sebesar 49%. Penambahan kadar

Tabel 8.
Nilai kekuatan tarik nanokomposit poliester tak jenuh/montmorillonite
nanoclay

Nanopartikel	Kadar (%)	Peningkatan Nilai Kekuatan Tarik (%)
	0	0
	2	5
	3	-10
	4	-7
	6	-19
	10	-27
	0	0
Montmorillonite <i>Nanoclay</i>	1	13
	2	40
	3	73
	4	33
	0	0
	1	8
	3	6
	5	-5

HNT setelahnya akan menurunkan nilai dari kekerasan nanokomposit. Hal tersebut menandakan bahwa nanokomposit memiliki kadar batas maksimal penambahan HNT yang akhirnya memengaruhi nilai kekuatan kekerasan. Namun dengan penambahan pada semua rasio HNT, nilai kekerasan mengalami peningkatan yang cukup baik dengan rata-rata peningkatan sebesar 35-40%. Persebaran yang merata dari halloysite *nanotube* menjadi salah satu faktor penting adanya peningkatan nilai kekerasan pada nanokomposit, sebab nanopartikel akan menjaga nanokomposit dari terjadinya deformasi dengan menyerap energi dari gaya yang diberikan secara merata [7].

Sifat kekuatan lentur telah diteliti [9] untuk penambahan halloysite *nanotubes* ke dalam nanokomposit bermatriks poliester tak jenuh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Dapat dilihat pada Tabel 5 bahwa terjadinya pengaruh penambahan dan pengurangan nilai kekuatan kelenturan pada nanokomposit dengan penambahan tertentu. Didapatkan pula peningkatan nilai kelenturan yang baik dengan pencapaian tertingginya sebesar 10% pada penambahan halloysite *nanotubes* sebanyak 3%. Adanya peningkatan nilai kekuatan lentur tersebut dapat dipengaruhi oleh adanya adhesi mekanik baik yang terjadi pada semua komponen nanokomposit [9]. Penambahan nanopartikel diatas kadar 3% terlihat akan menyebabkan turunnya grafik dari nilai kekuatan kelenturan yaitu sebesar 4%. Hal tersebut menunjukkan adanya titik maksimal yang bisa meningkatkan nilai kelenturan dengan penambahan pada rasio tertentu karena adanya batas kadar maksimum pada nanokomposit [9].

B. Poliester Tak Jenuh/Montmorillonite *Nanoclay*

Morfologi dari material nanokomposit poliester tak jenuh/montmorillonite *nanoclay* telah diteliti [11] dengan penambahan nanopartikel dengan kadar 0% dan 5%. Karakterisasi morfologinya menggunakan *scanning electron microscopy* atau SEM dideskripsikan pada Tabel 6.

Pada Tabel 6 dapat dilihat bahwa telah terjadinya peningkatan kekasaran pada permukaan yang terjadi pada nanokomposit. Pada bagian (a), terlihat bahwa hasil patahan memiliki permukaan yang halus serta cenderung lurus sebab

Tabel 7.
Nilai kekerasan nanokomposit poliester tak jenuh/montmorillonite
nanoclay

Nanopartikel	Kadar (%)	Penambahan Nilai Kekerasan (%)
	0	0
Montmorillonite <i>Nanoclay</i>	1	2
	3	1
	5	0.98

tidak ada penguat yang ditambahkan untuk bisa menguatkan nanokomposit. Hal tersebut mengindikasikan pola patahan yang terjadi yaitu pola patahan getas. Namun berbeda dengan bagian (a), pada bagian (b) secara signifikan kekasaran permukaan meningkat seiring dengan adanya penambahan MMT *Nanoclay*. Jika diamati kembali, ternyata MMT *Nanoclay* juga terdispersi secara acak dan baik. Hal tersebut terjadi karena adanya dispersi nanopartikel yang baik pada nanokomposit. Sifat terdispersi dengan baik ini dapat menjadi salah satu faktor bahwa penambahan MMT *Nanoclay* memungkinkan akan menaikkan kekuatan mekanik antar komponen *nanoclay* yang berada pada komposit [11].

Penambahan nanopartikel di atas kadar optimumnya akan menyebabkan fenomena aglomerasi atau penggumpalan pada nanopartikel. Aglomerasi secara tidak langsung dapat memengaruhi nilai sifat mekanik pada komposit [11].

Sifat kekuatan tarik telah diteliti [5][10][8] untuk penambahan montmorillonite *nanoclay* ke dalam nanokomposit bermatriks poliester tak jenuh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7.

Dapat dilihat pada Tabel 7 bahwa penelitian yang telah dilakukan [5][10][8] menunjukkan terjadinya peningkatan kekerasan pada permukaan yang terjadi pada nanokomposit dengan adanya penambahan montmorillonite *nanoclay*. Puncaknya dengan nilai maksimal kekuatan tarik yaitu pada penambahan 2% dari MMT *Nanoclay* sebesar 5%. Kemudian setelah penambahan 2% MMT *nanoclay*, terjadi penurunan hingga penambahan terakhir sebesar 10%. Rata-rata penurunan yang dialami oleh nanokomposit, karena penambahan MMT *Nanoclay* setelah 2%, yaitu 9-10% [5]. Lalu pada penelitian lainnya [10] Dapat dilihat bahwa pada penambahan 1% *nanoclay*, nilai kekuatan tarik meningkat sebanyak 13%. Kemudian pada penambahan 2% terjadi peningkatan nilai kekuatan sebesar 40%. Hingga pada puncaknya, peningkatan nilai kekuatan tarik dapat menyentuh angka 73% pada saat penambahan *nanoclay* sebesar 3%. Lalu penambahan setelahnya terjadi penurunan kekuatan. Kemudian pada penelitian lainnya [8] halnya pada penambahan 1%, nilai kekuatan komposit langsung berada pada posisi penambahan yang optimum, dengan penambahannya sebesar 8%. Kemudian penambahan setelahnya berangsur menurun dibandingkan sebelumnya dengan rata-rata penurunan sekitar 6 – 10%.

Dari berbagai data penelitian di atas, menunjukkan bahwa adanya keterbatasan dalam kadar optimal penambahan partikel dengan rentang penambahan di atas 3% akan menurunkan nilai kekuatan tarik dari nanokomposit. Lalu penambahan partikel MMT *Nanoclay* memiliki nilai yang optimum dengan menunjukkan nilai peningkatan yang baik pada rentang 1 – 3%.

Tabel 12.

Nilai kekuatan lentur nanokomposit poliester tak jenuh/montmorillonite *nanoclay*

Nanopartikel	Kadar (%)	Peningkatan Nilai Kekuatan Lentur (%)
	0	0
Montmorillonite	1	8
<i>Nanoclay</i>	2	10
	3	33
	4	-25

Tabel 12.

Perbandingan morfologi nanokomposit

Material	Komparasi morfologi	
Poliester Tak Jenuh/Halloysite <i>Nanotubes</i>	a)	Komposisi nanopartikel optimal 0 – 3%
	b)	Diameter Luar Partikel 30 – 60 nm
	c)	Panjang partikel 1 μ m
	d)	Bentuk partikel anisotropik
	e)	Interaksi partikel-partikel cukup baik
	f)	Interaksi partikel-matriks tidak baik
Poliester Tak Jenuh/Montmorillonite <i>Nanoclay</i>	a)	Komposisi nanopartikel optimal 0 – 3%
	b)	Diameter partikel <100 nm
	c)	Bentuk partikel anisotropik
	d)	Interaksi partikel-partikel cukup baik
	e)	Interaksi partikel-matriks baik

Hal tersebut terjadi karena adanya dispersi partikel dengan persebaran yang merata, membuat penambahan partikel mempengaruhi nilai mekaniknya. Modifikasi pada *nanoclay* juga dibutuhkan untuk bisa meningkatkan nilai adhesi dan interaksi antara *nanoclay* dengan polimer [8].

Sifat kekerasan telah diteliti [8] pada nanokomposit dengan penambahan montmorillonite *nanoclay* ke dalam matriks poliester tak jenuh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 8.

Dapat dilihat pada Tabel 8 bahwa adanya kenaikan nilai kekerasan seiring dengan adanya penambahan kadar HNT kepada nanokomposit. Pada penambahan 1% MMT *nanoclay*, didapatkan peningkatan nilai kekerasan paling tinggi, yaitu sebesar 2%. Hal tersebut terjadi karena lapisan dari *nanoclay* telah terdistribusi secara efisien dan merata dalam nanokomposit. Struktur yang berbentuk seperti terkelupas membuat *nanoclay* dapat menghambat perkembangan indentasi. Setelah penambahan sebanyak 1% *nanoclay*, penambahan kadar selanjutnya akan berangsur menurun dengan rata-rata penurunannya sebesar 1%. Terjadinya penurunan nilai kekerasan diakibatkan oleh adanya keterbatasan kadar optimum penambahan nanopartikel dalam nanokomposit. Lalu adanya faktor pembentukan struktur interkalasi pada penambahan *nanoclay* yang semakin banyak, membuat penambahan *nanoclay* tidak lagi berefek yang signifikan terhadap peningkatan kekuatan kekerasan pada nanokomposit [8].

Sifat kekuatan lentur telah diteliti [10] pada nanokomposit dengan penambahan montmorillonite *nanoclay* ke dalam

Tabel 10.

Perbandingan sifat mekanik nanokomposit

Material	Peningkatan kekuatan tarik (%)	Peningkatan kekuatan tekan (%)	Peningkatan kekuatan lentur (%)
Poliester Tak Jenuh/HNT	11	49	10
Poliester Tak Jenuh/MMT <i>Nanoclay</i>	73	2	33

Tabel 10.

Standarisasi lapisan gel pada kapal laut

Material	Sifat	Nilai
	Kekuatan tarik (MPa)	40
	Regangan patah (%)	2.0
Poliester Tak Jenuh	Modulus Elastisitas (MPa)	2700
	Kekuatan lentur (MPa)	80
	Stabilitas dimensi di bawah panas ($^{\circ}$ C)	60

matriks poliester tak jenuh seperti yang ditunjukkan pada Tabel 9.

Dapat dilihat pada Tabel 9 bahwa terjadinya pengaruh penambahan dan pengurangan nilai kekuatan kelenturan pada nanokomposit dengan penambahan tertentu. Puncaknya terjadi pada penambahan kadar *nanoclay* sebanyak 3%, di mana peningkatan yang terjadi yaitu sebesar 33%. Hal tersebut terjadi karena adanya dispersi yang baik dan adhesi yang baik pada kadar optimum, sehingga *nanoclay* dapat berkontribusi untuk menaikkan nilai kekuatan kelenturan. Setelah adanya penambahan 3%, nilai dari nilai kekuatan kelenturan turun secara drastis. Bahkan penurunan yang terjadi saat penambahan 4% kadar *nanoclay* yaitu sebesar 25% dari *neat* poliester tak jenuh. Hal ini terjadi karena dengan penambahan *nanoclay* secara berlebihan atau melewati batas optimum, akan terbentuknya aglomerasi atau penggumpalan pada *nanoclay* dan/atau terbentuknya void, sehingga membentuk penambahan tegangan yang cenderung melemahkan nanokomposit poliester tak jenuh/MMT *Nanoclay*. Serta penambahan *nanoclay* diatas 4% akan menambah kekakuan pada polimer [10].

C. Komparasi Komposit

Pada artikel ini telah dibandingkan data morfologi dan sifat mekanik dari pengaruh penambahan jenis partikel nano halloysite dan montmorillonite *nanoclay*. Komparasi data morfologi dari nanokomposit ditunjukkan pada Tabel 10 dan komparasisifat mekanik nanokomposit pada Tabel 11.

Tinjauan ini menggunakan 2 material dengan 6 jurnal yang bervariasi. Dari enam jurnal yang ditinjau, didapatkan informasi mengenai penelitian efek penambahan nanopartikel terhadap morfologi dan sifat mekanik terutama kekuatan tarik, kekerasan, dan kekuatan lentur. Nilai dari sifat mekanik nanokomposit sangat bergantung kepada peristiwa yang terjadi pada morfologi nanokomposit. Dalam hal ini, interaksi partikel dengan partikel dan partikel dengan matriks dapat dikatakan memberikan pengaruh yang besar pada sifat mekanik yang didapat. Bentuk dari nanopartikel juga mempengaruhi gaya mechanical interlock antar komponen.

Perbandingan nilai sifat mekanik komposit dengan diperkuat oleh Halloysite *Nanotube* dan Montmorillonite *Nanoclay* dapat

digunakan sebagai aplikasi lapisan gel pada kapal laut sesuai dengan aturan [12], seperti pada Tabel 12 berikut.

Secara sifat mekanik, penambahan partikel halloysite *nanotube* dan montmorillonite *nanoclay* dapat mencapai spesifikasi dari lapisan gel pada kapal laut. Hal tersebut dapat dilihat dari nilai kekuatan tarik yang mencapai dan melebihi nilai yang di standarkan. Namun tanah liat atau *clay* memiliki sifat absorpsi air yang baik, sehingga aplikasi lapisan gel pada kapal ini dapat diaplikasikan pada interior dalam kapal yang tidak bersentuhan langsung dengan air.

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan dari pembahasan jurnal komposit poliester tak jenuh/halloysite *nanotubes* dan poliester tak jenuh/montmorillonite *nanoclay* yang telah di lakukan adalah sebagai berikut:(1)Dari 2 jenis nanopartikel yang ditambahkan ke dalam nanokomposit, didapatkan adanya peningkatan kekasaran permukaan dan *mechanical adhesion* pada morfologi nanokomposit. Hal tersebut terjadi karena adanya persebaran partikel merata dan dispersi yang baik. Penambahan di atas kadar optimum akan menyebabkan terjadinya aglomerasi dan peristiwa lainnya yang dapat menyebabkan penurunan nilai sifat mekanik; (2)Dari 2 jenis nanopartikel yang ditambahkan ke dalam nanokomposit, secara garis besar dapat meningkatkan nilai kekuatan tarik, kekerasan, dan kekuatan lentur pada rentang penambahan tertentu; (3)Dari 2 jenis nanopartikel yang ditambahkan ke dalam nanokomposit, didapatkan peningkatan nilai dari sifat mekanik yang terbaik berdasarkan jenis dan bentuk nanopartikel pada peningkatan nilai kekuatan tarik yaitu Montmorillonite *Nanoclay (plateles)* sebesar 73%, nilai

kekerasan yaitu Halloysite (*Nanotubes*) sebesar 49%, dan nilai kekuatan lentur yaitu Montmorillonite *Nanoclay (plateles)* yaitu sebesar 33%.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Balasubramanian, *Composite materials and processing*. CRC press, 2013.
- [2] F. C. Campbell, *Structural Composite Materials*. 2010.
- [3] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Eighth., vol. Eighth Edi. Versailles, America: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [4] D. Ratna, *Handbook of thermoset resins*. ISmithers Shawbury, UK, 2009.
- [5] S. Calvo, M. G. Prolongo, C. Salom, and R. M. Masegosa, "Preparation and thermal-mechanical characterization of nanoclay-unsaturated polyester composites," *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 10, no. 4, pp. 2863–2869, 2010.
- [6] M. T. Albdiry and B. F. Yousif, "Toughening of brittle polyester with functionalized halloysite nanocomposites," *Compos. Part B Eng.*, vol. 160, pp. 94–109, 2019.
- [7] M. T. Albdiry and B. F. Yousif, "Morphological structures and tribological performance of unsaturated polyester based untreated/silane-treated halloysite nanotubes," *Mater. Des.*, vol. 48, pp. 68–76, 2013.
- [8] S. M. Razavi, S. J. Ahmadi, P. R. Cherati, M. Hadi, and S. A. R. Ahmadi, "Effect of electron beam irradiation on mechanical properties of unsaturated polyester/nanoclay composites reinforced with carbon and glass fibers," *Mech. Mater.*, vol. 141, p. 103265, 2020.
- [9] M. T. Albdiry and B. F. Yousif, "Role of silanized halloysite nanotubes on structural, mechanical properties and fracture toughness of thermoset nanocomposites," *Mater. Des.*, vol. 57, pp. 279–288, 2014.
- [10] N. Merah and O. Mohamed, "Nanoclay and water uptake effects on mechanical properties of unsaturated polyester," *J. Nanomater.*, vol. 2019, 2019.
- [11] K. Bagheri, S. M. Razavi, S. J. Ahmadi, M. Kosari, and H. Abolghasemi, "Thermal resistance, tensile properties, and gamma radiation shielding performance of unsaturated polyester/nanoclay/PbO composites," *Radiat. Phys. Chem.*, vol. 146, pp. 5–10, 2018.
- [12] Biro Klasifikasi Indonesia, "Rules For The Classification and Construction Part 1 Seagoing Ships Volume II Rules For Hull," 2014.